

Лабораторная работа № 17

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ, СОПУТСТВУЮЩИХ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Цель работы: изучение зависимости деформации полимерного материала – резинового образца цилиндрической формы – от напряжения при деформации растяжения-сжатия.

В работе рассматривается явление упругого последствия, гистерезис, а также определяется модуль Юнга, время релаксации и коэффициент поглощения энергии изучаемого образца.

Приборы и принадлежности: установка для деформации резинового стержня, набор разновесов от 1 до 5 кг.

Теория

Упругая деформация твердых тел описывается *законом Гука*

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (1)$$

где $\sigma = \frac{F}{S}$ – *нормальное напряжение* (отношение силы F , приложенной перпендикулярно поперечному сечению образца, к площади S этого сечения);

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ – *относительная деформация* (отношение удлинения Δl к первоначальной длине l образца);

E – *модуль упругости (модуль Юнга)*.

Модуль Юнга характеризует упругие свойства твердых тел при деформации растяжения-сжатия. Он численно равен величине напряжения, которое вызывает изменение длины образца вдвое, если деформация при этом остается упругой.

Закон Гука справедлив лишь для идеально упругих тел, для реальных же тел наблюдается отклонение от этого закона. Эти отклонения в области напряжений, не превосходящих предела упругости, объединяются общим понятием *неупругости*. Проявлением неупругости являются, например, *упругое последствие* и *упругий гистерезис*, подлежащие экспериментальному наблюдению в данной работе.

Явление упругого последствия заключается в изменении со временем деформированного состояния при неизменной величине напряжения. В этом случае после приложения нагрузки к образцу деформация возникает мгновенно, а продолжает увеличиваться с течением времени (*прямое упругое последствие*); также и после снятия нагрузки деформация образца исчезает не мгновенно, а продолжает уменьшаться во времени (*обратное упругое последствие*).

Зависимость деформации от времени при разгрузке может быть приближенно описана выражением

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \quad (2)$$

где ε_0 – относительная деформация в момент снятия нагрузки, ε – относительная деформация спустя промежуток времени Δt после снятия нагрузки, τ – время релаксации.

Время релаксации τ – величина, характерная для данного материала. Она показывает, за какое время деформация, оставшаяся после мгновенного снятия нагрузки, уменьшается e раз, т.е. уменьшится до величины

$$\varepsilon_\tau = \frac{\varepsilon_0}{e} = 0,37\varepsilon_0.$$

Если к образцу прикладывать сперва возрастающее напряжение, а затем производить разгрузку, то на графике $\sigma = f(\varepsilon)$ кривая нагрузки не будет совпадать с ветвью разгрузки. При полном цикле нагрузки-разгрузки график дает петлю гистерезиса (рис.1). Площадь петли пропорциональна доле энергии упругости ΔW , перешедшей в тепло.

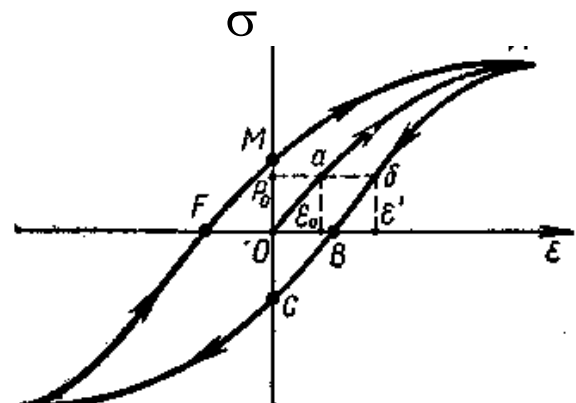


Рис.1.

Явления необратимого превращения в теплоту механической энергии (иначе, *диссипация энергии*) в процессах деформирования твердых тел называется *внутренним трением*.

Для количественной оценки внутреннего трения материалов часто пользуются относительной величиной — *коэффициентом поглощения*

$$\psi = \Delta W / W, \quad (3)$$

где W — энергия упругой деформации.

Явление неупругости присуще всем реальным твердым телам, как полимерным, так и низкомолекулярным, в том числе и металлам.

Явления неупругости металлов и других кристаллических тел связаны с дефектами кристаллографической решетки: *вакансиями, дислокациями* и вызванными ими неоднородностями структуры, наличием внутренних микронапряжений в твердых телах. Неупругость полимерных материалов обусловлена изменением структур макромолекул под действием механических напряжений.

Описание установки

Установка для наблюдения упругого последействия и упругого гистерезиса представлена на рис. 2. Она состоит из испытуемого резинового стержня 4, укрепленного в патроне 5. Патрон 5 крепится на стойке с помощью винтов 7. Нагрузка резинового стержня осуществляется посредством металлических тяг 6 и штока 9 разновесами, помещаемыми на платформы 3. Связь между величинами σ и ε можно в первом приближении установить законом Гука, который в этом случае принимает вид

$$2\sigma = \varepsilon E \quad (4)$$

так как верхняя половина стержня при этом растягивается, а нижняя сжимается. Поэтому на данной установке, для того чтобы вызвать некоторую деформацию ε , согласно формуле (1), нужно приложить вдвое большее усилие (2σ), чем при чистом растяжении.

Для устранения перекоса и напряжений изгиба тяги 6 и штоки 9 соединены шарниром 8.

Растяжение измеряется с помощью закрепленного в стойке индикатора часового типа 1 с пределами измерений от 0 до 1 мм и ценой деления шкалы 1 мкм. При деформации образца измерительный шток 9 перемещается, что приводит к изменению показаний индикатора.

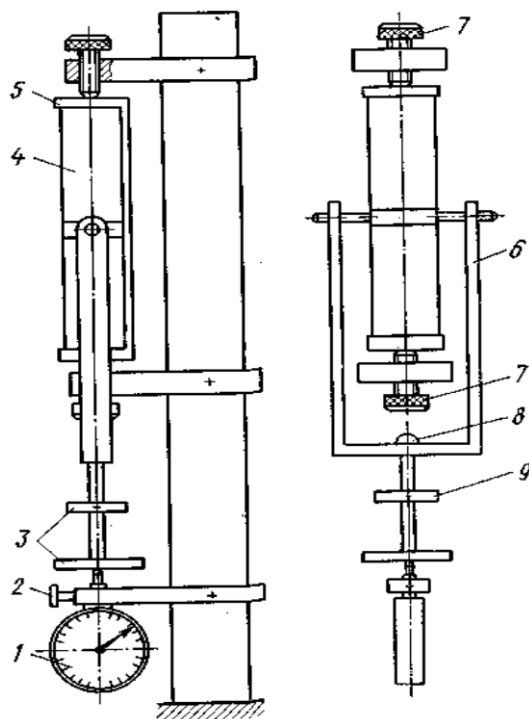


Рис.2.

Выполнение работы:

Задание 1. Определение модуля Юнга

1. Установите нулевое показание на индикаторе, перемещая его по стойке при отсутствии нагрузки, и закрепите винт 2 (рис. 2).

2. Произведите нагружение образца, для чего на одну из платформ положите разновес 1 кг и через 1 - 2 мин по индикатору определите величину деформации.

3. Проведите измерения абсолютных деформаций Δl для грузов 2, 3, 4 и 5 кг. При каждой нагрузке опыты повторяйте не менее пяти раз. Результаты измерений внесите в табл. 1.

Таблица 1.

m , кг	№	Δl , м	l , м	ε	$F = mg$, Н	S , м ²	σ , Па	E , Па
1	1							
	...							
	5							

	Ср.						
2	1						
	...						
	5						
	Ср.						
3	1						
	...						
	5						
	Ср.						
4	1						
	...						
	5						
	Ср.						
5	1						
	...						
	5						
	Ср.						

4. По результатам измерений постройте график зависимости напряжения от относительной деформации ε согласно формуле (4):

$$2\sigma = f(\varepsilon)$$

(площадь сечения S образца и его первоначальную длину l измерьте самостоятельно).

Определите модуль Юнга E по тангенсу угла наклона графика относительно оси абсцисс, учитывая при этом масштабы по осям x и y .

5. Оцените погрешности измерений.

Дополнительно для студентов кафедры физики и микроэлектроники:

Задание 2. Изучение упругого последствия

1. Установите нулевое показание на индикаторе при отсутствии нагрузки и закрепить винт 2.

2. Осторожно положите на платформу 3 груз 5 кг и одновременно включите секундомер.

3. По индикатору производите измерения абсолютных деформаций Δl сначала сразу после приложения нагрузки, далее в первую минуту отсчет производить через каждые 10 с, во вторую – через 30 с и, после того как скорость изменения деформации уменьшится, запись показаний производите через 1 мин. Общее время наблюдений должно быть не менее 5 – 6 мин. На этом измерения деформаций при нагружении закончите. Результаты внесите в табл. 2.

4. Проведите измерения абсолютных деформаций Δl при разгрузке. Для этого осторожно снимите груз и одновременно включите секундомер. В том же порядке, как указано в п. 3, производите измерения деформации во времени. Результаты внесите в табл. 2.

Таблица 2.

№	l, м	t, с	Нагрузка			Разгрузка		
			Δl , м	ε	$\ln \varepsilon$	Δl , м	ε	$\ln \varepsilon$
1		0						
2		10						
3		20						
4		30						
5		40						
6		50						
7		60						
8		90						
9		120						
10		150						
11		180						
12		240						
13		300						
14		360						

5. Постройте графики $\Delta l = f(t)$ при нагружении и разгрузении.

6. Постройте график $\ln \varepsilon = f(t)$ и определить время релаксации τ материала образца по углу наклона соответствующего графика к оси абсцисс, учитывая при этом масштабы по осям.

Прологарифмировав выражение (2), получим

$$\ln \varepsilon = \ln \varepsilon_0 - \frac{t}{\tau}.$$

Тангенс угла наклона линейной зависимости $\ln \varepsilon = f(t)$ равен

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{\tau},$$

тогда время релаксации

$$\tau = \frac{l}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

7. Сделайте заключение по полученным результатам и оцените погрешности измерений.

Задание 3. Наблюдение упругого гистерезиса

1. Установите нулевое показание на индикаторе при отсутствии нагрузки и закрепите винт 2.

2. На верхнюю платформу осторожно положите разновес 100 г и по шкале индикатора определите абсолютную деформацию Δl .

3. Постепенно нагружая образец грузами по 200 г, доведите нагрузку до 1 кг, после чего продолжайте нагружение по 1 кг до 4 кг.

При каждой нагрузке производите отсчет показаний индикатора, через 1 – 2 мин после каждого нагружения.

4. Аналогично указанному в п. 3, измерьте абсолютные деформации Δl при разгрузении, для чего снимите грузы с платформы в обратном

порядке (сначала по 1 кг, затем по 200 г). Результаты измерений внесите в табл. 3.

5. Переверните образец вокруг горизонтальной оси на 180° в стойке (тогда при приложении нагрузки та часть стержня, которая подвергалась ранее растяжению, будет сжиматься, и наоборот) и проведите измерения согласно п. 3 и 4. Результаты измерений внесите в табл. 3.

Таблица 3.

№	l, м	Поворот на 180°															
		Нагрузка				Разгрузка				Нагрузка				Разгрузка			
		m, кг	σ , Па	Δl , м	ε	m, кг	σ , Па	Δl , м	ε	m, кг	σ , Па	Δl , м	ε	m, кг	σ , Па	Δl , м	ε
1		0,100				4,000				0,100				4,000			
2		0,200				3,000				0,200				3,000			
3		0,400				2,000				0,400				2,000			
4		0,600				1,000				0,600				1,000			
5		0,800				0,800				0,800				0,800			
6		1,000				0,600				1,000				0,600			
7		2,000				0,400				2,000				0,400			
8		3,000				0,200				3,000				0,200			
9		4,000				0,100				4,000				0,100			

6. Вычислите напряжения σ в образце по формуле:

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S} = \frac{mg}{S},$$

где S – площадь сечения резинового стержня.

7. Приписав величинам напряжения и деформации во втором случае отрицательные знаки, постройте график $\sigma = f(\varepsilon)$.

8. Рассчитайте энергию упругой деформации W по формуле:

$$W = \frac{1}{2} k(\Delta l)^2 = \frac{1}{2} F_{\text{упр}} \Delta l_{\text{max}} = \frac{1}{2} m_{\text{max}} g \Delta l_{\text{max}},$$

где $m_{\text{max}} = 4$ кг, Δl_{max} – абсолютная деформация при максимальном нагружении m_{max} .

9. Значение энергии упругости, перешедшей в тепло ΔW , определите планиметрически, измерив площадь петли гистерезиса и умножив ее величину на масштаб по оси x и y .

10. Рассчитайте коэффициент поглощения по формуле (3) и занесите результаты вычислений в табл. 4.

$$\psi = \Delta W / W$$

Таблица 4.

W , Дж	ΔW , Дж	ψ

11. Оцените погрешности измерений.

Контрольные вопросы:

1. Какие изменения называются деформациями?
2. Перечислите виды деформаций.
3. Сформулируйте закон Гука.
4. Дайте определения нормального и касательного напряжений, относительной деформации и времени релаксации.
5. Каков физический смысл модуля Юнга?
6. В чем заключается явление упругого последствия?
7. Как деформация зависит от времени разгрузки?

Литература:

1. Стрелков С.П. Механика. - М.: Наука, 1975, - 559 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 1. Механика, - М.: Наука, 1979, - 519 с.
3. Хайкин С.С. Физические основы механики. - М.: Наука, 1971, - 751 с.
4. Матвеев А.Н., Киселев Д.Ф. Общий физический практикум. - М.: Изд-во МГУ, 1991, - 272 с.